





Aplicación de modelos de transferencia radiativa para el control operativo del programa BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*) del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña

Trabajo realizado por
ROSA DELIA GARCÍA CABRERA
para optar al grado de Doctor en Ciencias dirigido por:
Dra. Victoria Cachorro Revilla
Dr. Emilio Cuevas Agulló

16 de Diciembre de 2011







Convenio de Colaboración entre la Universidad de Valladolid y la Agencia Estatal de Meteorología para el desarrollo de metodologías y sistemas de control de calidad dentro de los programas de radiometría, fotometría, ozono y aerosoles atmosféricos en el marco del programa de Vigilancia Atmosférica Global de la Organización Meteorológica Mundial

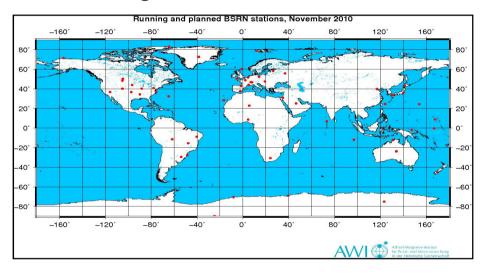
- 1. Desarrollo de los algoritmos, los métodos operacionales y de control de calidad necesarios para la puesta a punto y operatividad de una estación BSRN (*Baseline Surface Radiation Network Red de Referencia de Radiación en Superficie*)
- 2. Validación del modelo *LibRadtran* mediante la comparación con las medidas experimentales para diferentes condiciones atmosféricas en la estación de Izaña
- 3. Reevaluación y reconstrucción de la serie de radiación global en la estación de Izaña entre 1992 y 2010
- 4. Análisis del forzamiento radiativo en la estación BSRN de Izaña entre 2009 y 2010

- 1. Descripción de la estación BSRN de Izaña
- 2. Características y descriptiva del modelo de transferencia radiativa LibRadtran
- 3. Validación del modelo *LibRadtran* mediante la comparación con las medidas experimentales para diferentes condiciones atmosféricas en la estación de Izaña
- 4. Reevaluación y reconstrucción de la serie de radiación global en la estación de Izaña entre 1992 y 2010
- 5. Análisis del forzamiento radiativo en la estación BSRN de Izaña
- 6. Conclusiones
- 7. Líneas Futuras de Investigación

RED BSRN http://www.bsrn.awi.de



En 1988 la World Climate Research Program se planteó crear una red radiométrica a nivel mundial, BSRN, aunque no es realmente hasta 1992 cuando comenzó a funcionar desde el World Radiation Monitoring Center



En la actualidad está constituida por 61 estaciones

Objetivo fundamental de la Red: Proporcionar observaciones de radiación con la mayor calidad posible usando una alta frecuencia de muestreo

Las medidas obtenidas son utilizadas para:

- Vigilar a largo plazo los componentes básicos de la radiación
- Validar y evaluar medidas de satélite
- Proporcionar datos observacionales de altísima calidad, para contrastarlos con los modelos climáticos globales y locales



Las características climatológicas de la zona en la que se encuentra la estación de lzaña vienen dadas principalmente por el factor de la altitud: 2373 m s.n.m.

La posición y la fortaleza del anticición subtropical de las Azores al NW de las Islas



Capa de inversión térmica de espesor y altura variable que se sitúa entre los 1000-2000 m de altura:

MAR DE NUBES





Impide el desarrollo vertical de la nubosidad, favoreciendo el desarrollo horizontal y amortigua la llegada a la estación de Izaña de masas de aire procedentes de niveles bajos

Medidas Básicas Categoría I



Rad. Global Rad. Difusa 310 – 2800 nm

Rad. Directa: 200 - 4000 nm



Rad. de Onda Larga: 4500 – 42000 nm

Medidas Extendidas
Categoría II



Rad. UV-A: 315 - 400 nm



Rad. UV-B: 280 - 315 nm



Rad. Neta

Onda Corta: 300 – 2800 nm Onda Larga: 4500 – 42000 nm CAMPBELL CR-5000 16 bits 5000 medidas/s



Medidas Auxiliares
Categoría III



Contenido total de ozono



Presión, Humedad, Temperatura, Velocidad y Dirección del Viento: Radiosondeos

CORRECCIONES Y CONTROL DE CALIDAD DIARIO QUE SE APLICAN A LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES DE RADIACIÓN

Correcciones aplicadas al coeficiente de calibración:

Temperatura

Error Direccional

Valor Diario:

Nivel de Irradiancia

0.5 % Rad. Global y Difusa (Incertidumbre 2%)

0.2 % Rad. Directa (Incertidumbre 4%)

Control de Calidad:

- Detección de anomalías en el fichero diario de medidas
- Detección de sombreado en los instrumentos
- Días despejados: Simetría de la Rad. Global y Directa respecto al mediodía solar
- Rad. Global Derivada = Rad. Directa cos(θ) + Rad. Difusa

Límites recomendados por la red BSRN:

- 1. Límites físicamente posibles y extremadamente raros
- 2. Comparación entre diferentes medidas experimentales:
 - Radiación Global y Radiación Global derivada
 - Radiación Difusa y Radiación Global
- 3. La BSRN recomienda comparar las medidas experimentales de días despejados con modelos de transferencia radiativa

98% de las medidas se encuentran dentro de los límites recomendados por la BSRN

1. Descripción de la estación BSRN de Izaña

- 2. Características y descriptiva del modelo de transferencia radiativa LibRadtran
- 3. Validación del modelo *LibRadtran* mediante la comparación con las medidas experimentales para diferentes condiciones atmosféricas en la estación de Izaña
- 4. Reevaluación y reconstrucción de la serie de radiación global en la estación de Izaña entre 1992 y 2010
- 5. Análisis del forzamiento radiativo en la estación BSRN de Izaña
- 6. Conclusiones
- 7. Líneas Futuras de Investigación

Modelo de libre distribución disponible en la web: http://www.libradtran.org

(Autores: Bernhard Mayer, Arve Kylling y Ulrich Hamman)

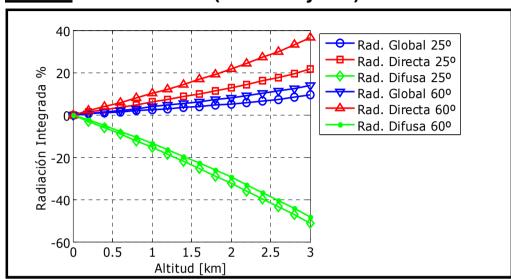


Las características básicas del modelo son:

- Atmósfera multicapa que calcula el campo de radiación resolviendo en la atmósfera la ETR por diversos métodos: Disort, PolRadtran, Twostr, Twostrpp, Sdisort, SpSdisort, Mystic
- Geometría unidimensional (1D)
- Estructura plano-paralela para la atmósfera
- Atmósfera compuesta por diferentes moléculas y aerosoles
- Modelo de scattering múltiple
- Absorción molecular tratada a través de la adaptación del modelo de bandas (LOWTRAN-7), pseudoespectral
- Modelo de aerosoles: Perfiles de Shettle (Shettle, 1989)

| PARÁMETROS GENERALES | | |
|---|--------------------------------|--|
| Ecuación Transferencia Radiativa | Disort2 (Stamnes et al., 2000) | |
| Perfil de Atmósfera | Atmósfera Latitudes Medias | |
| Flujo Solar Extraterrestre | Kurucz (Kurucz,1992) | |
| Absorción de los diferentes gases | Secciones Eficaces | |
| Bandas Moleculares | Pseudoespectral | |
| Rango Espectral | 300 nm-2600 nm | |
| VARIABLES DE ENTRADA | | |
| Altitud | 0 m s.n.m. | |
| Albedo de la Superficie | 0.20 | |
| Agua Precipitable | 15 mm | |
| Espesor Óptico de Aerosoles (AOD) | AOD(500 nm) = 0.20 | |
| o Parámetros de Ångström (α y β) | α = 1.3 β = 0.1 | |
| Parámetro de Asimetría (g) | 0.85 | |
| Albedo de scattering simple (ω _o) | 0.90 | |
| SZA | 25° y 60° | |
| Columna Total de Ozono | 300 U.D. | |

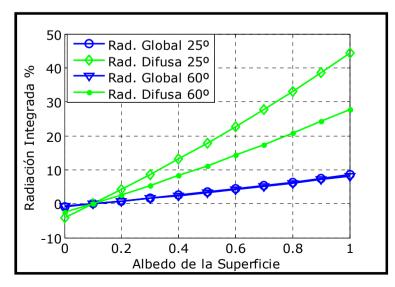
Altitud: 0 km a 3 km (SZA 25° y 60°)



0 km a 2 km (SZA 25°)

- Rad. Global ↑ 5%
- Rad. Directa ↑ 13%
- Rad. Difusa **4** 36%

Albedo de la superficie: 0 a 1 (SZA 25° y 60°)



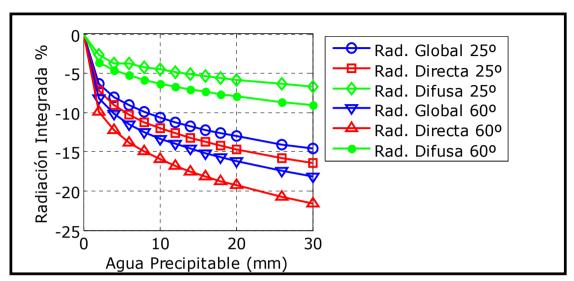
0.20 a 0.30 (SZA 25°)

- Rad. Global ↑ 1%
- Rad. Difusa ↑ 4%

0.20 a 0.80 (SZA 25°)

- Rad. Global ↑ 6%
- Rad. Difusa ↑ 29%

Agua precipitable: 0 mm a 30 mm (SZA 25° y 60°)



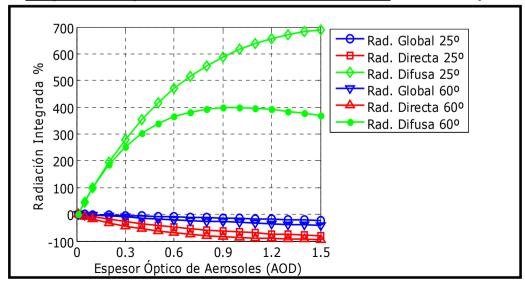
0 mm a 2 mm (SZA 25°)

- Rad. Global **4** 6%
- Rad. Directa **V** 7%
- Rad. Difusa **4** 3%

0 mm a 30 mm (SZA 25°)

- Rad. Global **15**%
- Rad. Directa **16**%
- Rad. Difusa **→** 7%

■ Espesor Óptico de Aerosoles (AOD): 0 a 1.5 (SZA 25° y 60°)



0 a 0.1 (SZA 25°)

- Rad. Global 🖖 1%
- Rad. Directa **4** 9%
- Rad. Difusa ↑ 99%

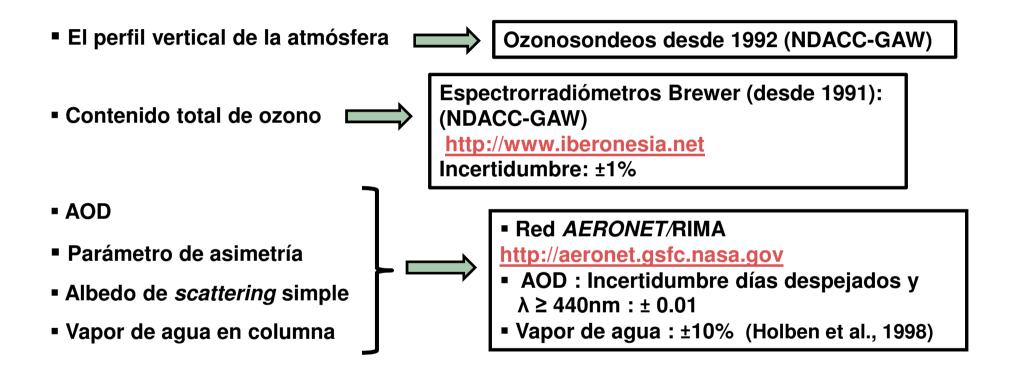
0 a 0.5 (SZA 25°)

- Rad. Global **→** 7%
- Rad. Directa 42%
- Rad. Difusa ↑ 416%

- 1. Descripción de la estación BSRN de Izaña
- 2. Características y descriptiva del modelo de transferencia radiativa LibRadtran
- 3. Validación del modelo *LibRadtran* mediante la comparación con las medidas experimentales para diferentes condiciones atmosféricas en la estación de Izaña
- 4. Reevalución y reconstrucción de la serie de radiación global en la estación de Izaña entre 1992 y 2010
- 5. Evolución del forzamiento radiativo en la estación BSRN de Izaña
- 6. Conclusiones
- 7. Líneas Futuras de Investigación

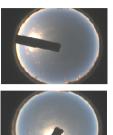
Evaluar la capacidad del modelo para simular la radiación en la estación de Izaña

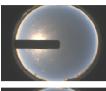
Las variables de entrada:

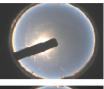


■ Albedo de la superficie : Albedómetro en la estación de Izaña (Incertidumbre : ±4%)

20 DE ABRIL DE 2009



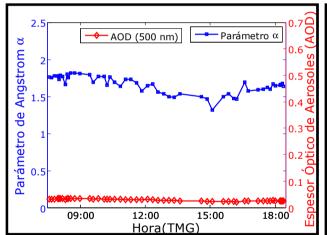


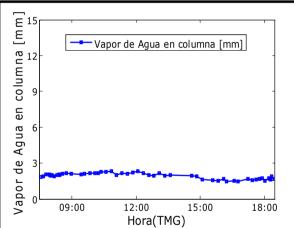


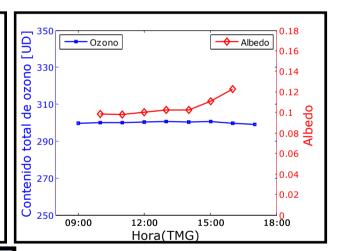












AOD (500 nm) : 0.03 ± 0.01 α (440-870 nm) : 1.66 ± 0.12

g: 0.55 ± 0.02

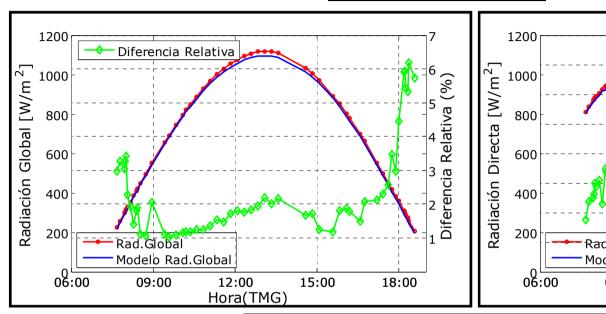
 ω_{o} : 0.99 ± 0.01

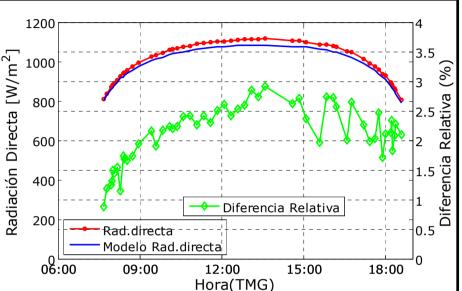
 H_2O : 1.91 ± 0.24 mm

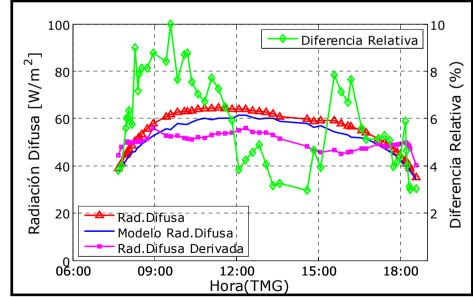
 O_3 : 300 ± 1 U.D.

Albedo: 0.11 ± 0.01

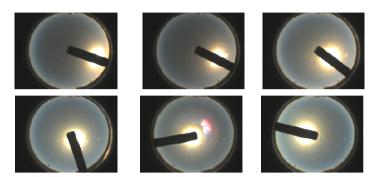
20 DE ABRIL DE 2009

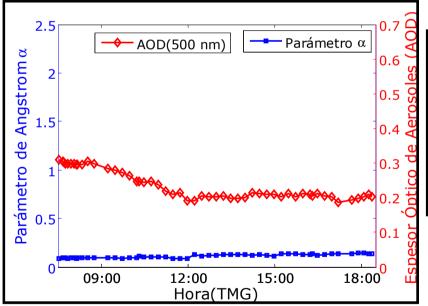


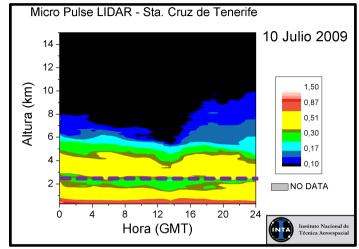


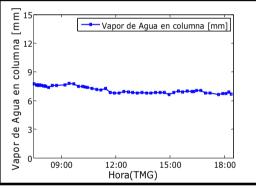


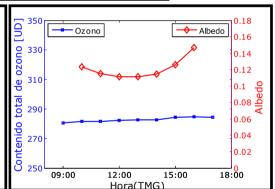
10 DE JULIO DE 2009











AOD (500 nm) : 0.24 ± 0.04 α (440-870 nm) : 0.11 ± 0.02

 $g: 0.73 \pm 0.01$

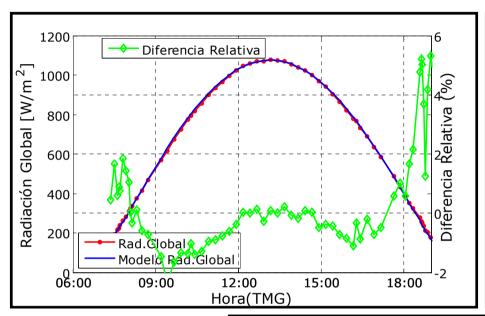
 ω_o : 0.98 ± 0.01

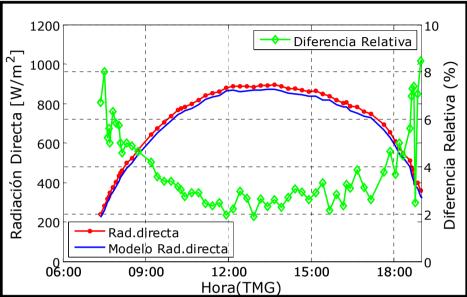
 $H_2O: 7.13 \pm 0.37 \text{ mm}$

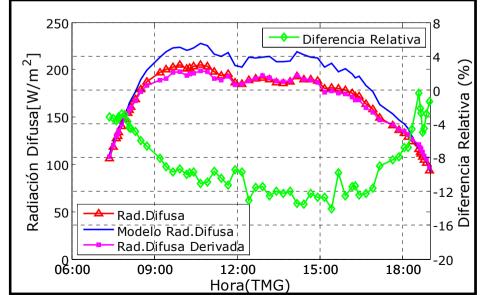
O₃: 283 ± 1 U.D.

Albedo: 0.12 ± 0.01

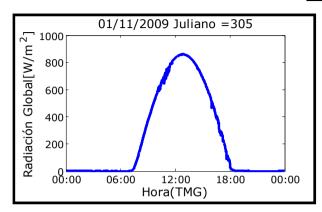
10 DE JULIO DE 2009

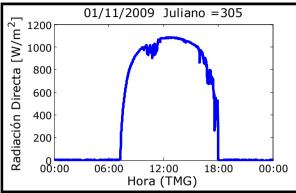


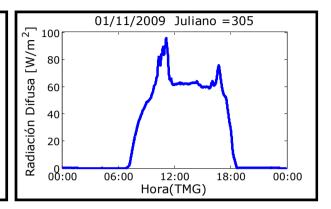


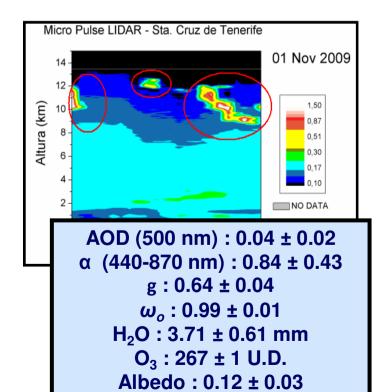


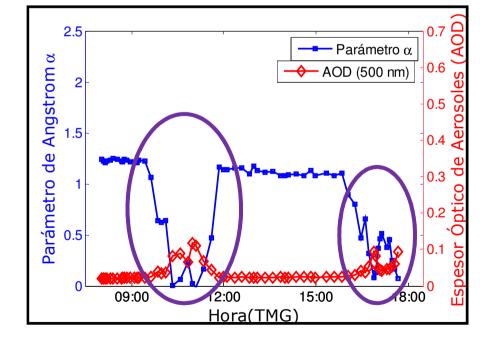
1 DE NOVIEMBRE DE 2009





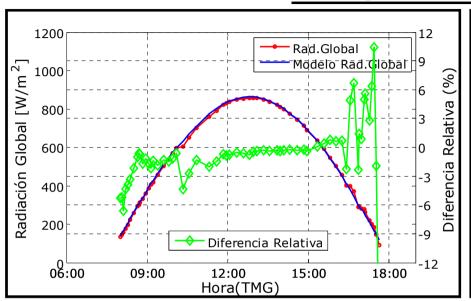


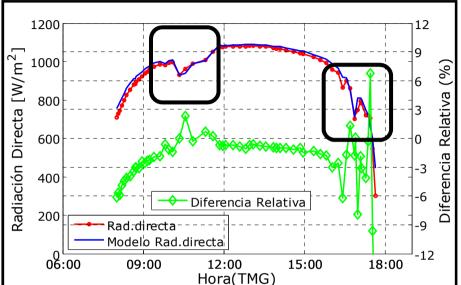


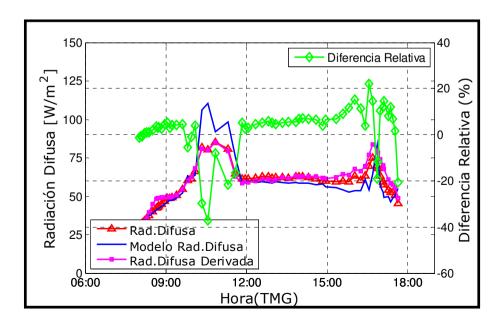


Nivel 1.0 AERONET

1 DE NOVIEMBRE DE 2009







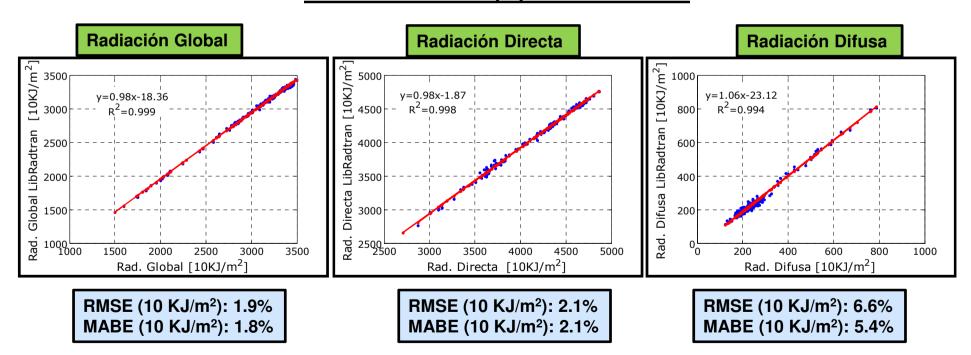
- 1. Descripción de la estación BSRN de Izaña
- 2. Características y descriptiva del modelo de transferencia radiativa LibRadtran
- 3. Validación del modelo *LibRadtran* mediante la comparación con las medidas experimentales para diferentes condiciones atmosféricas en la estación de Izaña
- 4. Reevalución y reconstrucción de la serie de radiación global en la estación de Izaña entre 1992 y 2010
- 5. Evolución del forzamiento radiativo en la estación BSRN de Izaña
- 6. Conclusiones
- 7. Líneas Futuras de Investigación

Criterios de selección de días despejados:

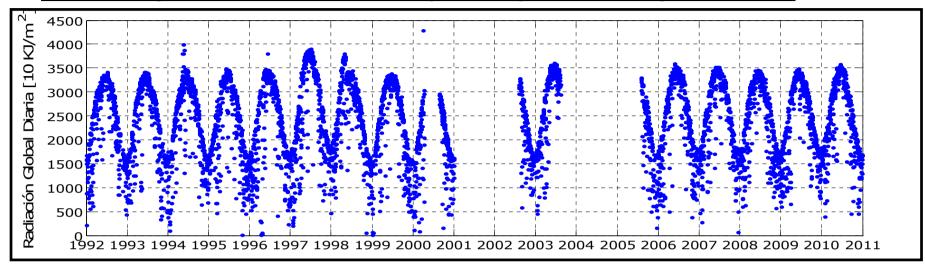
- Método Visual
- Índice de claridad (Liu & Jordan,1960)
- Criterio desarrollado por Long & Ackerman (2000)

| | 2009 | 2010 |
|-------------------------------|-----------|----------|
| | (Nº días) | (№ días) |
| Método Visual | 144 | 119 |
| Índice de Claridad (Kt ≥ 0.7) | 272 | 286 |
| Long & Ackerman, (2000) | 143 | 124 |

Comparación entre los valores diarios medidos experimentalmente y los simulados con el modelo los días despejados: 2009 - 2010



1. <u>Medidas experimentales de radiación global registradas con piranómetros</u>

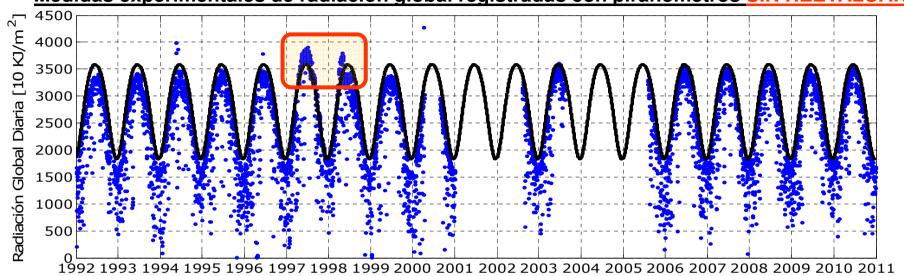


- Seleccionamos los días despejados
- Simulamos la radiación global diaria de los días despejados

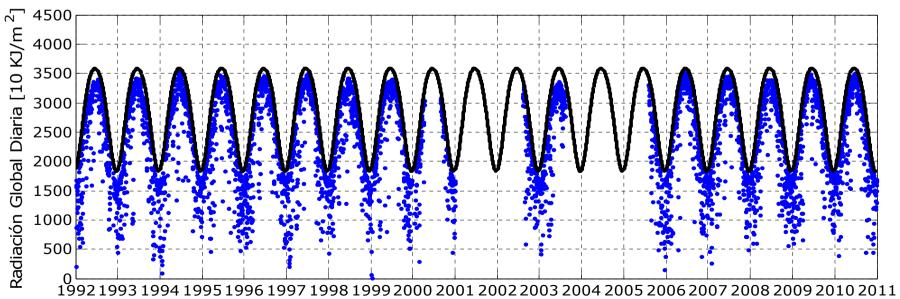
Variables de entrada al modelo

- Albedo 0.10
- Contenido total de ozono 300 U.D.
- Parámetro de asimetría 0.75
- Albedo de scattering simple 0.97
- AOD PMOD, MFRS, PFR, CIMEL
- Vapor de Agua Radiosondeos
- Calculamos el cociente entre las medidas experimentales y las simuladas en un entorno al mediodía solar (WMO, 2002) y determinamos una "nueva constante de calibración"

Medidas experimentales de radiación global registradas con piranómetros SIN REEVALUAR



Medidas experimentales de radiación global registradas con piranómetros REEVALUADAS



2. Medidas de insolación

| Mayo 2000 – Agosto 2000 | Halifawata Oamahall Otaaliaa | |
|------------------------------|------------------------------------|--|
| Enero 2001 – Septiembre 2001 | Heliógrafo <i>Campbell-Stockes</i> | |
| Septiembre 2003 – Julio 2005 | Heliógrafo Kipp & Zonen | |

$$\frac{H}{H_0} = a \; \frac{n}{N_d} + \; b$$

H: Valor diario de la Rad. Global

Ho: Valor diario de la Rad. Global extraterrestre

n : Número de horas de insolación

Nd : Número máximo de horas posibles de insolación

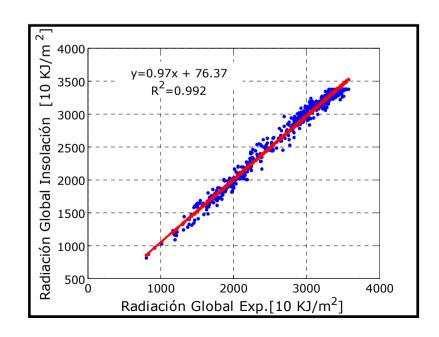
a y b : Coeficientes

(Ångström, 1924,1956; Prescott, 1940)

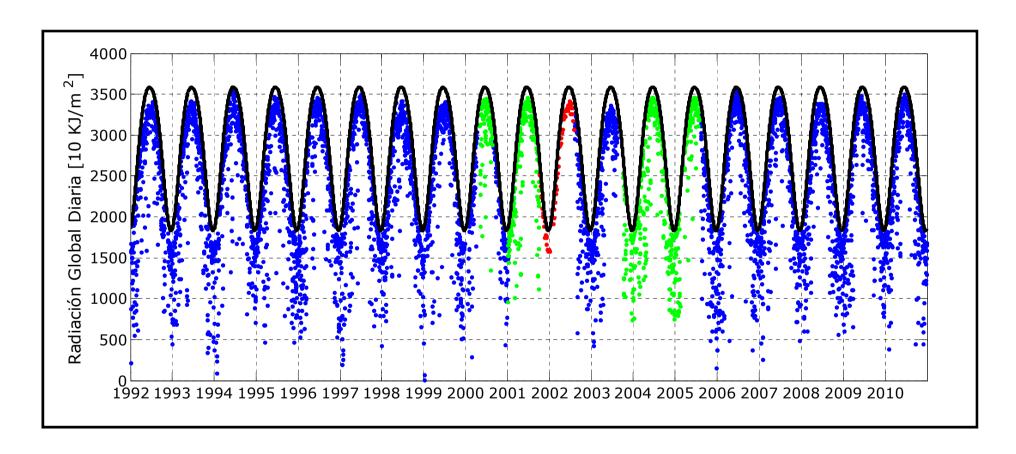
<u>Coeficientes a y b</u>: Regresión lineal entre medidas experimentales y medidas de insolación entre 1994 y 2008:

$$a = 0.179 \ \Delta a = [0.176, 0.182]$$

$$b = 0.117 \Delta b = [0.114, 0.119]$$



Reevaluación y reconstrucción de la serie de valores diarios de la radiación global entre 1992 y 2010 en la estación de Izaña.

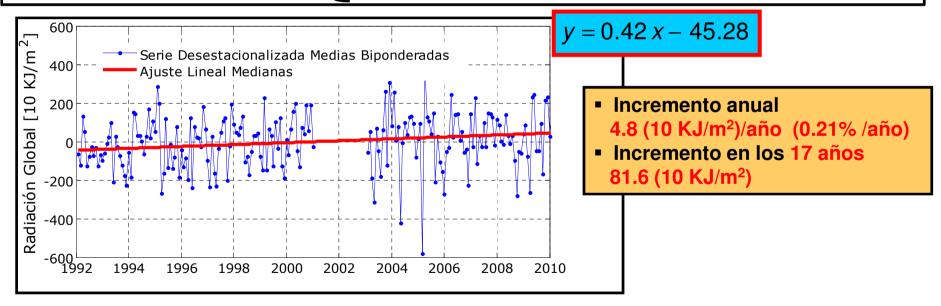


Serie Homogénea : Test Petit - Wilconxon

La serie de radiación global presenta una tendencia (95%): Test Spearman

Lanzante (1996): Método de regresión de las pendientes de las medianas de las medidas: La pendiente entre cada par de medidas posibles

$$y_{i} = a + bx_{i} \Longrightarrow \begin{cases} b = mediana \ (b_{k}) \ ; \quad b_{k} = \frac{(y_{i} - y_{j})}{(x_{i} - x_{j})} \\ a = mediana \ (res_{i}) \ ; \quad res_{i} = y_{i} - (b \ x_{i}) \end{cases}$$



Posibles causas:

- 1. Variación en la constante solar
- Cambios en la nubosidad
- 3. Variaciones en las concentraciones de aerosoles atmosféricos

???

- 1950 y 1990 : Reducción de la radiación solar (6 a 9 W/m²/año): "Global Dimming" (Ohmura, 1989; Dutton et al., 1991; Gilgen et al., 1998 ; Stanhill y Cohen, 2001)
- <u>A partir de 1990</u>: Aumento de la radiación solar, especialmente en las latitudes medias: "Global Brightening" (Wild et al., 2005)

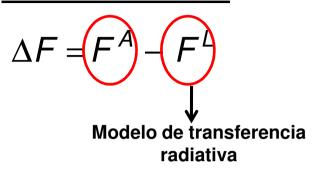
Hodges (2004), Wild et al., (2005), Wild (2009): Variación de la radiación global entre 1992 y 2001 (300 estaciones distribuidas a lo largo de todo el planeta)

- Estaciones oceánicas: Aumento de la radiación global : 0.1 y 1.61 W/m²/año con un promedio de 0.66 W/m²/ano
- Estaciones continentales: Disminución de la radiación global

- La tendencia creciente observada en la serie de radiación global en la estación de Izaña entre 1992 y 2010 coincide con el efecto "Global Brightening"
- Rad. Global en la estación de Izaña experimenta un aumento de 1.33 W/m²/año

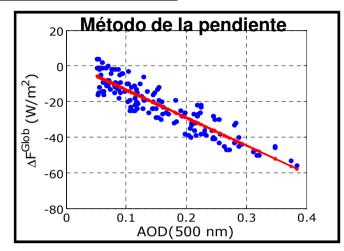
- 1. Descripción de la estación BSRN de Izaña
- 2. Características y descriptiva del modelo de transferencia radiativa LibRadtran
- 3. Validación del modelo *LibRadtran* mediante la comparación con las medidas experimentales para diferentes condiciones atmosféricas en la estación de Izaña
- 4. Reevalución y reconstrucción de la serie de radiación global en la estación de Izaña entre 1992 y 2010
- 5. Evolución del forzamiento radiativo en la estación BSRN de Izaña
- 6. Conclusiones
- 7. Líneas Futuras de Investigación

Forzamiento Radiativo



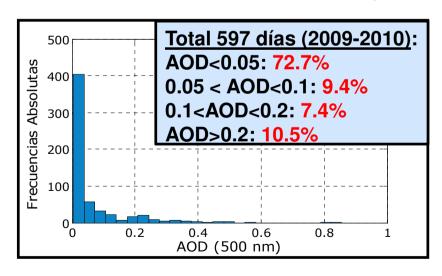
Eficiencia del Forzamiento Radiativo

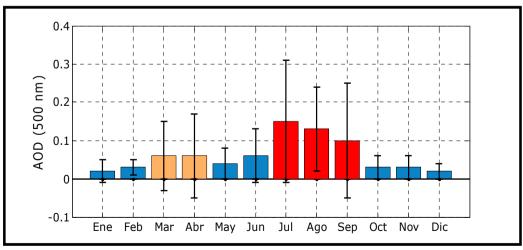
$$\Delta F^{eff} = \frac{\Delta F}{AOD}$$

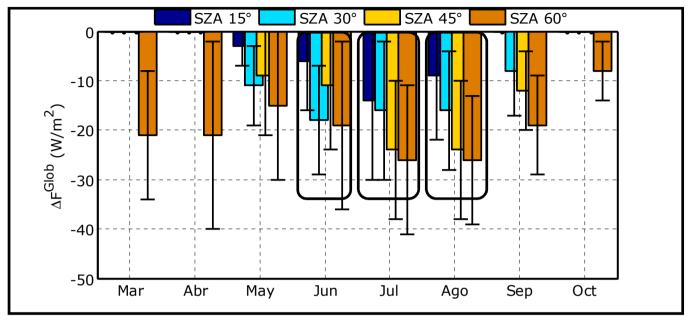


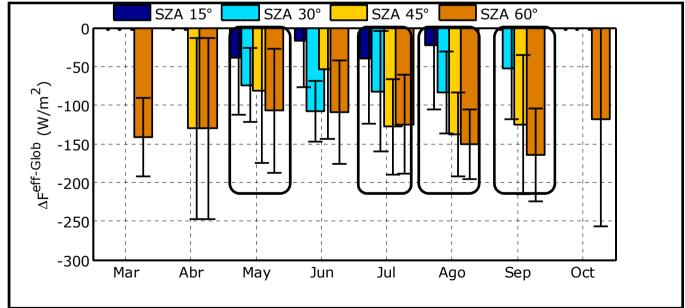
2009 -2010 Estación BSRN de Izaña

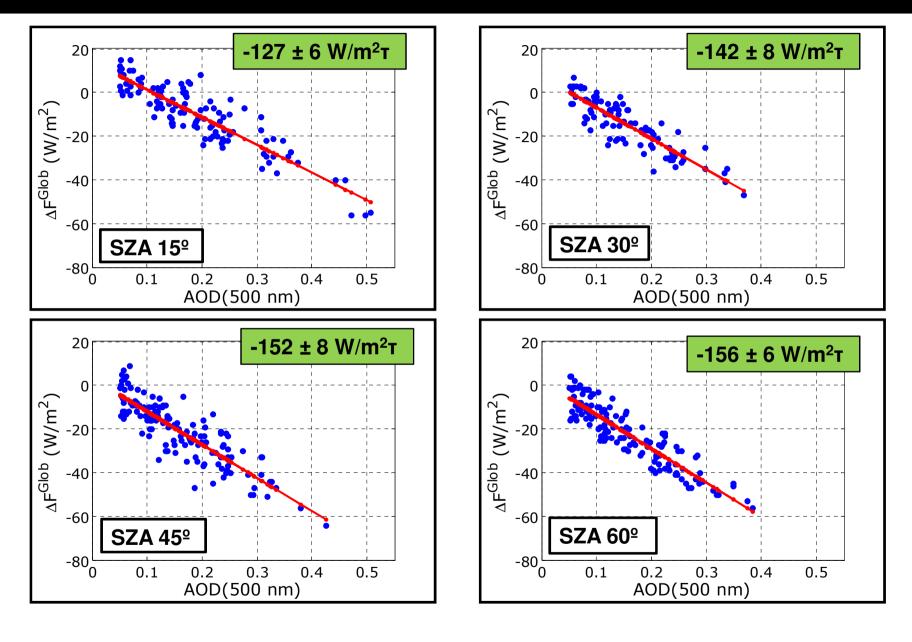
- ∆F debido a los aerosoles atmosféricos a los SZA: 15°, 30°, 45° y 60°
- Turbiedad en la atmósfera : AOD (500 nm) ≥ 0.05





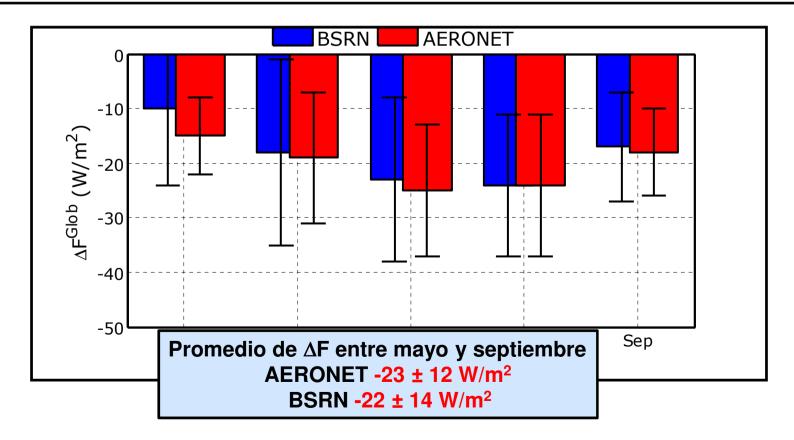


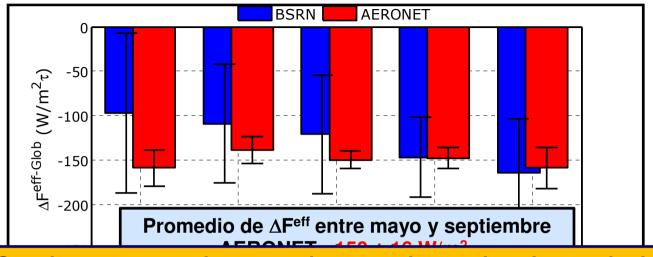




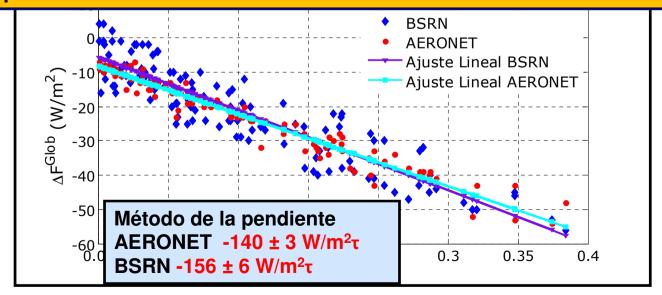
- Red AERONET : ∆F y ∆Feff instantánea
- Utiliza un modelo de transferencia radiativa para evaluar la irradiancia solar (Derimian et al, 2008 ; García et al., 2008)
- Rango de SZA empleado por AERONET : 50° y 80°

Seleccionamos las medidas instantáneas coincidentes de ΔF y ΔF^{eff} facilitadas por AERONET y los valores determinados a partir de las medidas BSRN de Izaña: Mayo a Septiembre (118 medidas instantáneas)





Se observa un mejor acuerdo entre las estimaciones de la eficiencia de AERONET y de la BSRN aquellos meses que presentan valores altos de AOD



- 1. Descripción de la estación BSRN de Izaña
- 2. Características y descriptiva del modelo de transferencia radiativa LibRadtran
- 3. Validación del modelo *LibRadtran* mediante la comparación con las medidas experimentales para diferentes condiciones atmosféricas en la estación de Izaña
- 4. Reevalución y reconstrucción de la serie de radiación global en la estación de Izaña entre 1992 y 2010
- 5. Evolución del forzamiento radiativo en la estación BSRN de Izaña

6. Conclusiones

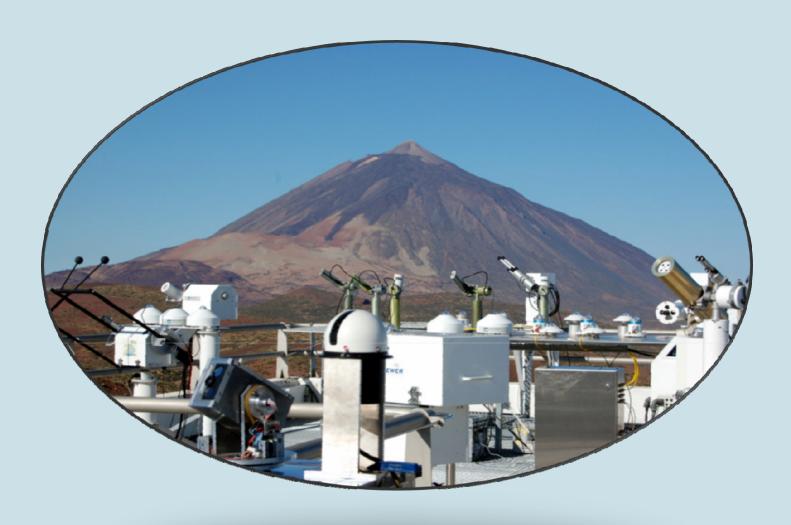
7. Líneas Futuras de Investigación

- Al comparar medidas experimentales con las simulaciones en condiciones de cielo despejado con presencia de mar de nubes hemos obtenido que para las tres componentes de la radiación el modelo subestima ligeramente las medidas experimentales pues las diferencias relativas están próximas al 3% (muy próximas a la incertidumbre instrumental).
- Si consideramos días afectados por intrusión sahariana obtenemos que la radiación global simulada con el modelo es sobreestimada respecto a las medidas experimentales. Para SZA≤70°, las diferencias no superan el 2.5%, e incluso, en las horas próximas al mediodía solar no superan el 1%. La radiación directa es subestimada por el modelo respecto a las medidas experimentales, alcanzando las máximas diferencias a SZA≥70°.
- La comparación entre la radiación medida experimentalmente y la simulada muestra un excelente acuerdo. La diferencia relativa para la radiación global diaria es menor del 2% para más del 80% de los días despejados. Para la radiación directa más del 95% de las medidas comparadas presentan una diferencia relativa menor del 2%. Sin embargo, para la radiación difusa, únicamente el 42% de los días despejados presentan diferencias menores al 5%.
- El excelente comportamiento del modelo LibRadtran nos permite utilizarlo como herramienta fundamental para llevar a cabo controles de calidad de las diferentes medidas experimentales, así como para reconstruir y reevaluar series de radiación.

- Las medidas de insolación permiten determinar la radiación global diaria con un alto grado de fiabilidad. Para 2009 y 2010, considerando únicamente días despejados, se obtienen diferencias menores al 4% entre medidas experimentales y derivadas a partir de la insolación.
- En la estación de Izaña se ha observado un aumento significativo de la radiación global de 1.33 W/m²/año entre 1992 y 2010 que coincide con lo observado por otros autores en estaciones situadas a latitudes medias coincidiendo con el conocido efecto "global brightening". Se ha descartado que pueda haber sido ocasionado por una variación en la constante solar, en cambio podría deberse a variaciones en la nubosidad o a una disminución en la concentración de aerosoles atmosféricos. Por ello es necesario realizar un análisis detallado de estos factores.
- Los máximos valores de ΔF de la radiación global, coinciden con los meses en los que tenemos un mayor promedio mensual de AOD y un menor promedio de α . Se produce un aumento del ΔF y de la ΔF^{eff} instantánea en función del SZA.
- El Δ F entre las medidas de la BSRN y las medidas de AERONET presentan un excelente acuerdo. El Δ F entre mayo y septiembre dado por *AERONET* es de -23±12 (W/m²) y el obtenido a partir de las medidas BSRN es -22±14 (W/m²).

- 1. Descripción de la estación BSRN de Izaña
- 2. Características y descriptiva del modelo de transferencia radiativa LibRadtran
- 3. Validación del modelo *LibRadtran* mediante la comparación con las medidas experimentales para diferentes condiciones atmosféricas en la estación de Izaña
- 4. Reevalución y reconstrucción de la serie de radiación global en la estación de Izaña entre 1992 y 2010
- 5. Evolución del forzamiento radiativo en la estación BSRN de Izaña
- 6. Conclusiones
- 7. Líneas Futuras de Investigación

- Conocer en detalle el impacto ocasionado por la presencia del mar de nubes en la isla de Tenerife en la radiación UV y solar espectral medidos experimentalmente en la estación de Izaña.
 Complementariamente realizar un análisis del albedo solar y espectral de la superficie en la estación de Izaña utilizando diferentes métodos.
- Analizar de forma más exhaustiva las causas que explican un aumento en la radiación global entre 1992 y 2010 en la estación de Izaña. Para ello se estudiará la serie temporal de concentración de partículas y se realizará un análisis detallado de la evolución de la nubosidad baja, media y alta a diferentes horas del día.
- Realizar un estudio comparativo con diferentes modelos de transferencia radiativa para conocer su comportamiento en una estación de alta montaña.
- Estudiar el forzamiento y la eficiencia del forzamiento radiativo de la radiación global entre 1994
 y 2011 y ampliar este estudio a diferentes rangos espectrales: UVB, UVA, PAR y radiación infrarroja.
- Ampliación de la comparación entre el forzamiento y la eficiencia del forzamiento radiativo de la serie de radiación global medida experimentalmente en la estación BSRN y la facilitada por AERONET.



Muchas Gracias por su atención